

- [5] C. D. Anderson, *Phys. Rev.*, **43**(1933), 491.
- [6] O. Chamberlain, E. Segre, C. Wiegand et al., *Phys. Rev.*, **100**(1955), 947.
- [7] G. Baur, G. Boero, S. Brauksiepe et al, Production of Antihydrogen, CERN 内部报告, Dec. 22, (1995).
- [8] C. T. Munger, S. J. Brodsky and I. Schmidt, *Hyp. Int.*, **76**(1933), 175; *Phys. Rev. D*, **49**(1994), 3228.
- [9] M. Charlton, J. Eades, D. Horvath et al., *Phys. Rep.*, **241**(1994), 65.
- [10] J. Eades, *Nature*, **379**(1996), 674.

## 微重力科学进展\*

胡文瑞

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要** 微重力科学是研究重力极大地减小的一种极端环境中的流体科学、材料科学、生物科学和技术, 以及物理学若干基础问题的新兴学科。近年来, 由于地面研究的加强, 空间实验的增加以及实验定量化水平的提高, 微重力研究取得了很好的进展。

**关键词** 微重力科学, 空间材料科学, 微重力流体物理, 空间生物技术

**Abstract** Microgravity science studies fluid science, materials science, bio-science and technology, and some fundamental physics subjects under an extreme environment where gravity decreases greatly. In recent years, good results have been achieved due to emphasis on ground-based research, more space experiment opportunities and improved facilities for quantitative experiments.

**Key words** microgravity science, space materials science, microgravity fluid physics, space bio-technology

生活在地球上的人们已经习惯于地球重力场的作用。地球表面的重力加速度  $980\text{cm/s}^2$  作用于所有物体上, 使它们受到指向地心的作用力, 使受热膨胀的流体因浮力而上升, 使不同密度的流体分层而大密度介质下沉。人类的进化也是在重力场作用下逐步演化, 一旦处于超重或失重状态就会发生生理变化, 以至产生疾病。大至宏观的物质, 小至细胞和组织都在地面受到地球重力加速度的作用, 一旦局部环境中的重力水平极大地减小, 物体就处于几乎失重的状态, 这就是微重力环境。

微重力科学就是研究微小重力环境中物质运动规律的科学。它不像相对论力学去研究近光速现象, 也不像量子力学去研究微观过程, 它仍然着重于探索宏观运动的规律。但是, 自然界的许多宏观运动过程并不需要重力起主导作

用, 而在地面环境中不可避免地要受到重力的作用, 因此在微重力环境中将更有利于研究这些过程的机理; 此外, 许多自然界的宏观过程与微观过程之间有紧密的联系, 因此重力对宏观过程的影响也必然反映到与之关联的微观过程中, 而微重力环境也为研究这类相关过程提供了好的机遇。

在近地轨道的航天飞行器中, 飞行体运动的离心力与地球的重力大体平衡, 那里的有效残余重力水平大约只有地面重力加速度的  $10^{-6}$ , 真正可以达到微重力的量级。在卫星工程中有许多微重力的流体管理问题, 而微重力科学和应用则是载人航天任务中空间利用的核心。在载人航天探索的前 20 年, 人们经常接触

\* 1995 年 9 月 5 日收到。

微重力环境, 希望了解微重力带来的特征, 试图利用微重力环境来获益, 因而提出许多科学探索和商业利用的建议<sup>[1]</sup>。实践表明, 微重力环境中的过程远比人们预计的要复杂得多。随着重力水平极大地减弱, 物质运动规律的特征可以发生极大的变化, 而不仅仅是在运动方程中把重力项忽略不计那么简单。在微重力环境中, 许多在地面被地球重力效应所掩盖的“次级效应”变成了主要过程因素, 控制了微重力环境的过程。诸多挑战性问题促进了微重力科学的发展。

## 1 90 年代的微重力科学

在载人航天计划发展的初期, 人们对微重力的理解还不深刻, 容易从概念上很直观地把微重力理解为牛顿力学中物体受到的体积力(重力)趋于零。这时, 由于浮力减弱, 可以提供更好的材料加工环境; 由于密度分层效应的消失, 可以使不同密度的介质均匀地混合; 由于压力梯度可以趋于零而能提供更加均匀的热力学状态。例如, 许多人致力于在空间生长均匀、完整和大尺寸的半导体单晶, 耗费了大量的人力和物力, 但至今仍然没有生长出比地面更好的功能性材料。除了空间飞行器中实验条件的限制以外, 主要仍是对微重力环境中的特殊过程缺乏认识。在微重力环境中, 一些表面和界面相关联的过程变得突出了, 热毛细对流、浸润性、接触角、相变等在地面被浮力和分层现象所掩盖的因素成为重要的过程因素, 使微重力过程变得复杂起来<sup>[2]</sup>。90 年代微重力科学的主要目标在于探索微重力环境中的自然规律的特征, 促进地面科学和技术的发展, 并为今后的应用奠定科学基础。微重力科学为发展基础物理学、流体科学、材料科学和生物科学等诸多自然科学领域提供了机遇<sup>[3]</sup>。

微重力环境为研究许多物理学的重大课题提供了机遇。已经进行相当多的一个研究领域是临界现象, 这也是凝聚态物理中的一个重要课题。在地面重力作用下造成的压力梯度必然

会有密度梯度。当趋于液 - 气临界点时, 只能在地面极小的一点区域中满足临界密度条件。对一个毫米厚度的 He 样品, 实验要求温度范围满足  $(T - T_c)/T_c < 10^{-7}$ , 而微重力环境可以使实验精度比地面最高分辨率高两个数量级。美国和欧洲都进行了多次临界点实验, 取得了很好的结果。重整化群理论要求临界点附近发生二级相变时比热有奇异性, 这个结果在地面实验中很难验证, 而在微重力实验中已看出了变化趋势。进一步的实验计划还在安排之中。广义相对论是物理学的基本原理之一, 微重力环境为广义相对论中“等效性原理”实验创造了条件。在地面的微震动限制了重力质量和惯性质量的测量精度, 只能达到  $3/10^{11}$ , 在近地轨道飞行器的微重力环境中, 该精度可提高到  $1/10^{15}$ 。在空间微重力环境中验证广义相对论原理的计划正在运筹之中, 可望在下世纪初实现。

流体过程是微重力环境中极具特色的课题。与流体传热和传质相对应的对流和扩散将十分敏感地受到重力的影响。从理论上讲, 当浮力对流极大地减小以后, 表面能力不均匀所引起的流体运动就可以构成一些新的耗散体系, 诸如热或浓度毛细对流、液滴或气泡动力学, 以及包括胶体在内的分散系统的聚集等。事实上, 微重力环境为研究纯扩散以及交叉扩散过程提供了好的条件。这些新课题对非线性科学、流体力学、输运现象以及分子力的作用等都很重要。其次, 燃烧现象是人们无处不遇的。在微重力环境中消除了浮力的影响和重力分层, 可以更好地研究化学反应动力学和流动之间的耦合。显然, 这些过程不仅具有学术上的意义, 而且也有重大应用价值。在空间生长材料以及生物技术过程都与流体的传热和传质密切相关, 而更好地理解燃烧规律必然将有助于人们改进热机的效率和减少环境的污染。另外一个正受到重视的领域是低温流体物理, 它包括超流过程、低温热力学过程及稳定性等, 美国宇航局专门制定了一个微重力的低温过程计划。

生物科学和生物技术将可望成为下个世纪

的科学前沿,目前仍然极大地依赖于实验过程中的经验。在微重力环境中已经生长出比地面更高质量的蛋白质单晶,可以由 X 衍射测量出更精细的结构。这是目前微重力环境中最具应用前景的项目。人们期望在空中生长出大尺寸和完整的蛋白质单晶,带回地面或在空间实验室中分析出细致结构后,促进地面的生物工程。其次,微重力环境提供了细胞和组织在悬浮的三维环境中生长和设计无应力条件下生长的可能,这就可以在亚细胞层次上研究细胞生长和培养的机理,从而更好地促进细胞生物学的发展,甚至可能为今后设计出新的药品提供机会。此外,人们在空间利用连续流式电泳已经成功地分离出生物大分子材料,其效率比地面高几百倍,相分离的技术也正在研究之中。由于生物科学和技术研究中经验仍占有重要成分,在微重力研究中发展量化研究方法,探讨新的方法和技术,将会对地面的生物科学和技术起到重要的促进作用。

空间材料科学是微重力科学中投资最多和规模最大的领域。从 90 年代以来,人们不急于在空间制造比地面更好的功能材料,而是更多地从事基本规律的研究。现代材料科学的主要兴趣在于从微观(0.1—1nm)到细观(0.1—100 $\mu$ m)尺度上理解材料的形成、结构和性质。由于浮力对流的消除,不同密度的成分可能均匀地混合,以及可以发展无容器过程,微重力环境确实为材料科学提供了发展机遇。微重力研究涉及到金属和合金、聚合物、无机单晶、陶瓷和玻璃,以及在单晶衬底外延薄层等;生长方法包括溶液、熔体和气相生长。几乎地面主要的体生长单晶的技术都在空间微重力环境中进行了实验。近年来,人们着重研究材料生长的机理,诸如对微结构的控制和预计、相变界面过程、热和质量的传递、材料的热物理性质、成核,以及重力对材料生长过程的影响等。空间材料科学一直是以半导体材料和光电子材料为主,最近对金属和合金的研究正在加强,而气相和液相外延生长薄膜单晶的探索也正在开展。

微重力环境是一种极端的物理条件,它可

以进行许多在地面难于进行的实验研究。30 多年的探索,特别是近年来的量化研究已经取得了可喜的成就,但由于实验机会较少,还有大量的研究有待于安排。在本世纪内还将着重于探索基本规律及其应用的可能性,并为以后可能的商业应用奠定基础。

## 2 近年来微重力科学的发展趋势

近些年来,由于国际政治形势的变化,空间大国将空间活动作为国家之间竞争的政策逐步改为合作的政策。这样,各国载人航天计划都在缩减,而更强调空间活动的效益。各国在缩减载人航天硬件研制的同时,加强了微重力科学和应用的投入,使近几年的成果十分突出。

微重力科学的研究大体上可分为空基研究和地基研究两部分。经过长期和大量的地基研究后,总要到空间微重力环境中去进行验证和实验。近二、三年来西方国家进行空间微重力实验的机会比过去 20 年还要多。就与航天飞机有关的空间实验计划而言,1992 年有国际微重力实验室 IML-1,美国微重力实验室 USML-1,日本空间实验室 SL-J,美国微重力载荷 USMP-1 等;1993 年利用航天飞机发射了欧洲空间局的尤利卡微重力实验平台;1994 年又进行了 USMP-2 和 IML-2 实验;1995 年安排了航天飞机与俄国和平号空间站的联合任务 Shuttle-Mir 1 和 Shuttle-Mir 2,以及 USMP-3 和 USML-2。平均起来,每年可以有 8—10 个航天飞机的标准载荷框用来进行蛋白质晶体生长、细胞培养和燃烧等项目的研究。这么多的空间微重力实验机会为重大问题的突破提供了机遇。

90 年代以来,人们对微重力研究的发展历程进行了总结和展望,并提出了许多建议,其中主要的是在今后一段时间内要加强微重力环境中的基本规律研究,去增进人类的知识。对物理现象的性质进行实验和验证,可有助于地面的科技进步,并为开发地球以外的微重力资源奠定基础。强调基本规律探索的思想,主导着

最近几年的微重力研究. 与此相应地,要求加强地面研究的准备,其中包括在空间实验之前从事大量的实验室模拟,短时间微重力实验,数值模拟等研究. 根据统计,一项好的空间实验项目,大约需要6年的地面研究基础. 另一方面,要求增强空间实验的定量化水平,这包括实验的先进学术思想,对实验过程的监测,实验硬件的高精度,以及发展遥科学和载荷专家的实时操作等. 由于空间实验的机会很少和经费昂贵,人们学会了更有效地利用这些机会,试图更深刻地理解微重力过程的规律.

以空间定量化的微重力实验为契机,1992年以来确实取得了一批微重力科学的成果. 目前极具吸引力的一个项目是在空间微重力环境下生长蛋白质单晶. 近年来,人们更在机理研究方面深入,除进行气相扩散法生长单晶外,还完成了溶液/溶液扩散法生长单晶. 在微重力环境中可以维持很大的浓度梯度,溶液扩散法似乎更具有优越性. 在微重力环境中已经生长出比地面更好的蛋白质单晶. 科学家的研究在于理解为什么在微重力环境中能长好单晶,以及用什么方法才能长好蛋白质单晶. 过去凭经验进行试探的蛋白质单晶生长研究,现在已开始建立物理模型,研究这类特定的输运过程. 同时,定量化的实验已要求实时地监测生长过程和环境过程. 这些物理学的研究方法无疑地会促进生物技术的发展,同时也具体地不断改进空间蛋白质单晶的研究效率. 由于空间蛋白质单晶生长的前景和重要性,美国宇航局的马歇尔空间飞行中心最近专门成立了一个生物大分子实验室,加强这方面的研究.

流体物理是微重力空间实验中不断取得成果的领域. 在空间微重力环境中研究得较多的流体物理课题是由表面张力不均匀而引起的流动特征,其中包括等温液桥的稳定性,非等温半浮区液桥由定常流向振荡流的过渡及对流特征,多层不相混溶液体在外加温差时的对流和稳定性,液滴和气泡在温度梯度场中的迁移,液滴的约束、控制和稳定性等. 这些研究使人们不断地加深了对在重力效应消失以后,由表面

张力不均匀在各种特定系统中产生流动这一现象的认识. 显然,这类新型的流体系统为研究非线性特征、流动稳定性以及转换过程等基本规律提供了新的机会. 微重力燃烧是另一个取得重大进展的领域. 微重力环境中浮力对流等过程的消除,使化学反应过程的定量化机理研究得以很好进行. 对一些简单的燃烧过程,已进行了模型化的研究,使理论模型能符合实验结果. 这些燃烧过程包括液滴的燃烧、颗粒固体的燃烧、液池的燃烧等;对于预混火焰和非预混火焰的过程也做了大量的工作,包括点火、冒烟和火焰扩散、近临界火焰及燃烧稳定性、湍流燃烧的过渡等. 由于燃烧的研究还与载人飞行器中的防火密切相关,它的研究更受到载人航天计划的重视. 微重力燃烧研究在50年代始于东京大学的简易落塔实验,现在则是世界上5个百米以上落塔和几个百米以下落塔的主要研究项目,也是空间微重力实验的重点项目之一.

多年来,人们都试图在空间生长出更好的半导体材料. 美国的研究重点是三元化合物晶体,例如  $\text{HgCdTe}$ ;俄国、德国和中国的研究重点是二元化合物单晶,例如  $\text{GaAs}$ . 俄国利用其和平号空间站的长时间工作条件,生长出了5cm直径的大尺寸  $\text{GaAs}$  单晶棒,声称其缺陷密度低于  $500/\text{cm}^3$ . 西方国家对俄国样品进行了分析,认为单晶棒的质量仍不如地面最好的样品. 近些年来,不少人把注意力转向研究空间材料生长过程的机理,特别是空间晶体生长过程与纯扩散过程的比较. 美国宇航局的马歇尔空间飞行中心专门设计了一个实验,研究残余重力对晶体横向分凝的影响. 由于航天飞机绕地球飞行时,地球大气密度变化会产生残余重力的量值变化,其方向对于生长晶体样品也不是对称的. 利用  $\text{HgCdTe}$  进行空间实验,结果表明  $\text{CdTe}$  的摩尔含量在横向的不均匀度可达5%以上. 德国科学家研究了不同的生长条件下  $\text{GaAs}$  单晶微观结构的形态,以及外加磁场强度对空间晶体生长的影响. 结果表明,外加磁场除了抑制对流的有利作用外,还可能有激发其他导致不均匀过程的作用,其影响也不是简单的线

性关系。近来,建议更强调金属、合金及聚合物等材料研究的呼声较高。美国耗资 1200 万美元进行了枝晶生长的空间实验任务,得到了完整的枝晶结构,其枝晶头部的生长速度明显地低于地面生长的值,与纯扩散理论的预计值相当吻合,只是在过冷度小于 0.2 K 时比扩散理论值略大。由于基本规律研究的加强和实验定量化水平的提高,空间材料生长在各个方面都取得一批好结果,用气相生长和溶体生长方法长出了较好的单晶。人们普遍重视研究传热和传质、残余重力或重力跳动以及外加磁场等宏观过程对材料微观形态结构的影响。空间材料科学的成果实际上已经加深了人们对材料生长过程的认识,也促进了地面的材料科学研究。

### 3 微重力科学的展望

微重力科学已经取得了重大的成果,一些重大的物理课题,诸如等效性原理的验证,重整化群理论的验证,低温流体物理的研究等,正在孕育着重大的突破。这些科学成果正在和继续在丰富着人类的知识宝库。实际上,微重力科学与微重力应用是不可分割的两个方面,科学的发展必然为应用和技术的发展奠定基础。许多微重力应用的项目已经和正在发展。

微重力科学的一个重要环节是进行空间较长时间的微重力实验,特别是有人操作的实验,这就有一个实验机会的问题。运送 1kg 的实验设备到近地空间大约需要 2 万美元,宇航员操作一小时大约需要 6 万美元。因此,在地面只需要几十万美元的研究项目,到天上去做几天实验往往要耗资上千万美元。在美国、前苏联空间竞争的时代,如此的耗费是和显示大国地位相联系的,带有浓厚的政治色彩。近年来,由于国际形势的变化,与政治决策密切结合地进行科学研究的作法受到动摇,人们提出了提高微重力研究的投资效益。另一方面,国家空间科学的经费是有限的,大量资金用于载人空间实验,必然影响到其他无人的空间科学计划,诸如空间天文、空间物理等,从而引起科学界不少专

家的议论。因此,近年来,载人航天计划在不断缩小规模和削减经费。在此背景下,微重力研究计划则更加深入,地面预研工作进行得更加周密,空间实验的计划更有水平。新的形势促使微重力科学家们更好地工作,这将更好地推进微重力科学的进展。

中国的微重力科学研究始于 80 年代后期的国家高技术发展计划。经过 8 年的努力,已经有了一个良好的起步<sup>[4]</sup>。以中国科学院为主,已经有 30 多个研究室,组成了微重力科学不同学科领域的研究集体,涉及到了微重力科学的主要领域。诸如中国科学院物理研究所的空间材料科学基础性研究,半导体研究所的空间 GaAs 单晶生长实验,力学研究所的微重力流体物理研究,工程热物理研究所的微重力燃烧研究,生物物理研究所的空间蛋白质晶体生长研究,动物研究所的空间细胞培养实验,上海植物生理研究所的重力生物学研究等。这些研究集体都是利用多年地面研究的积累而转入微重力研究领域。从某种意义上讲,中国的微重力科学发展是受到中国航天技术进展的促进。中国的返地卫星已发展为微重力实验平台,为进行空间微重力实验提供了技术保证。航天工业总公司兰州物理研究所与中国科学院的半导体研究所合作,为促进利用返地卫星进行微重力实验作出了重大贡献。微重力研究对中国这样的发展中国家,必然是相当艰难的,提高有关计划的效益和水平至关重要。随着中国经济实力的增长,必然会在微重力科学和应用领域作出更大的贡献。

在今后 2—3 年内,仍将进行空间实验的研究。在今后两年内,预计还有 7 次航天实验计划。在完全建成国际号空间站之前,近几年安排了一个过渡时期,即利用俄国的和平-空间站进行微重力实验。现在,美国航天飞机与俄国空间站已经对接成功,今后每年将有进行两次和平号空间站微重力实验的计划。国际空间站预计将在 2000 年前后建成。尽管投资和规模都比原来缩小,但空间站的实验功能并没有减小。国际空间站运行以后,人们可以长时

间地和更多地进行微重力科学研究,这将必然会极大地促进微重力科学和应用的进展。

微重力实验包括在空间有人操作和无人操作实验。一些比较复杂的过程实验,特别是流体科学实验,往往需要载荷专家在空间进行操作。有时在空间排除一个故障也需要宇航员花费几天的时间。在有人操作的航天飞机和空间站上,微重力环境不很理想,往往会有各种因素引起的重力跳动。对于一些可以用自动化控制或者利用遥科学操作的实验项目,更适宜于在无人的卫星或微重力平台上进行精心的实验。例如验证等效性原理的卫星实验计划(STEP)预计于下世纪初发射入轨。俄国发展了一系列微重力卫星系列,最大的将可提供4kW能源和运行半年的周期。欧空局和日本也都发展了微重力实验平台,由美国航天飞机负责发射和回收。中国在返地卫星的基础上也发展了微重力实验平台,促进了微重力的研究。无人的微重力空间实验迫切需要发展遥科学,提高空间实

验的水平和效率。

现在,不少人正在议论重返月球和进行火星探测。月球重力只有地球重力的17%,月面过程和火星过程都涉及许多低重力的课题。这样,今后的月球和行星的有人探测就和微重力研究联系到一起了,将会提出许多新的课题。

微重力科学的发展从载人航天时代开始,才只有30多年的历史,它在自然科学中是一个年青的领域。可以看出,微重力研究是一个既有丰富学术内涵,又有重大应用前景的研究领域。

### 参 考 文 献

- [1] 胡文瑞,物理,18(1989),11.
- [2] H. O. 瓦尔特编,王景涛、葛培文等译,空间流体科学与空间材料科学,中国科学技术出版社,(1991).
- [3] Committee on Microgravity Research, Microgravity Research Opportunities for the 1990's, NRC, Washington, D. C., (1995).
- [4] W. R. Hu(胡文瑞), *Microgravity Quarterly*, 3(1993), 75.

## 纳米尺度的光学成像与纳米光谱\*

### ——近场光学与近场光学显微镜的进展

朱 星

(北京大学物理系,人工微结构与介观物理国家实验室,北京 100871)

**摘 要** 近场光学是指当光探测器及探测器-样品间距均小于辐射波长条件下的光学现象。利用近场光学扫描显微镜和近场光谱仪,不但能够以突破衍射极限的超高分辨率在纳米尺度实现光学成像,而且还可获得纳米微区的光谱信息。文章介绍近场光学的原理及其在凝聚态物理领域中的应用与进展,并给出了我们的初步结果。

**关键词** 近场光学,扫描探针显微镜,近场光谱

**Abstract** Near field optics has become a fast growing interdisciplinary subject in recent years. The near-field scanning optical microscope and near-field spectroscopy can produce optical images with resolution far better than the diffraction limit and near-field spectroscopic information on a nanometric scale. The basic principles and recent progress of

\* 1995年9月22日收到。